

УДК 551.2+551.14+541.12.017+536.25

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ГРАНИЦЕ ЯДРО–МАНТИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПЛЮМОВ

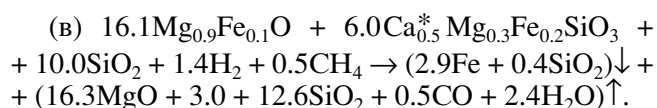
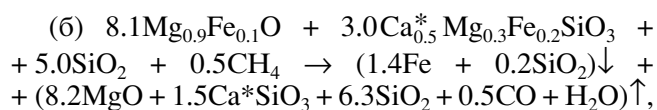
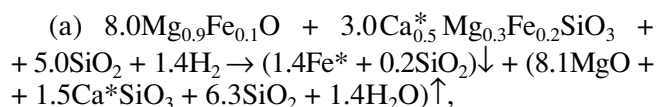
© 2003 г. Академик Н. Л. Добрецов, А. А. Кирдяшкин, А. Г. Кирдяшкин

Поступило 04.08.2003 г.

Процессы тепло- и массообмена на границе ядро–мантия во многом определяют работу термохимической машины Земли и глобальную геодинамику Земли [1, 2]. Есть основания считать, что на ядро–мантийной границе формируются термохимические плюмы, определяющие тектонику горячих полей, в отличие от тектоники литосферных плит, которая определяется конвекцией в астеносфере [2]. Термохимический плюм может образовываться на границе ядро–мантия при наличии теплового потока из внешнего ядра и локальном поступлении химической добавки, понижающей температуру плавления вблизи подошвы нижней мантии. В области теплового пограничного слоя при понижении температуры плавления ниже температуры границы происходит плавление в нижней мантии и подъем плюма. Локальными источниками термохимических плюмов могут быть выступы на границе ядро–мантия высотой 10–20 км, а источником добавки, понижающей температуру плавления, – реакции железосодержащих фаз нижней мантии с водородом и метаном, выделяющимися на ядро–мантийной границе [2, 4]. Для тепловых плюмов основные параметры были оценены в теоретическом и лабораторном моделировании [2, 3]. Вопрос о термохимической природе мантийных плюмов обсуждался пока только в общей постановке [2, 4, 5]. Однако условия формирования и важнейшие параметры термохимических плюмов еще не определены. Задача наших исследований – оценить вероятные физико-химические условия на границе ядро–мантия и с их учетом рассчитать (в первом приближении) тепло- и массообмен термохимического плюма. В результате исследований приведены возможные реакции с участием водорода и метана на границе ядро–мантия, вследствие которых образуются соединения, понижающие температуру плавления нижней мантии, и оценены вероятные составы и температуры эвтектик, создаю-

щихся в результате реакций на ядро–мантийной границе. Определены распределения температуры и концентрации химической добавки, понижающей температуру плавления в канале плюма, а также рассчитаны основные параметры термохимического плюма для физических свойств нижней мантии.

Нижняя мантия согласно последним работам [6–8] состоит из магнезиовюстита (Mg, Fe)O, стишовита SiO₂ и кальциевого перовскита (Ca*, Mg, Fe)SiO₃. Компонент Ca* включает также Na и Al, которые частично могут входить в перовскитовую структуру, частично образовывать более сложные самостоятельные фазы [6]. По оценкам [2, 9] состав нижней мантии в отношении главных компонентов (мас. %): 46.1 SiO₂, 37.8 MgO, 8.2 FeO и 7.7 Ca*O. Пересчитывая на молекулярные соотношения и вышеназванные фазы, получаем, что нижняя мантия может состоять на 50% из магнезиовюстита Mg_{0.9}Fe_{0.1}O, на 30% из стишовита SiO₂ и на 20 из % перовскитовой фазы (или фаз) примерного состава Ca*_{0.5}Mg_{0.3}Fe_{0.2}SiO₃. Добавляя к ним водород, концентрирующийся у оси вращения вихрей в пограничном слое у границы ядро–мантия [4], получаем реакции



В первых скобках – состав эвтектики Fe и SiO₂, стекающей во внешнее ядро и оцененной в [4] как 12–13% SiO₂ в соответствии с оценками примеси в ядре 7%Si и 4.5%O [9]. Во вторых скобках – вычисленный состав эвтектоидного флюидосодержащего кремнисто-окисного расплава, поднимающегося вверх в мантийном термохимическом плюме. По сравнению с составом нижней мантии

Объединенный институт геологии,
геофизики и минералогии
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

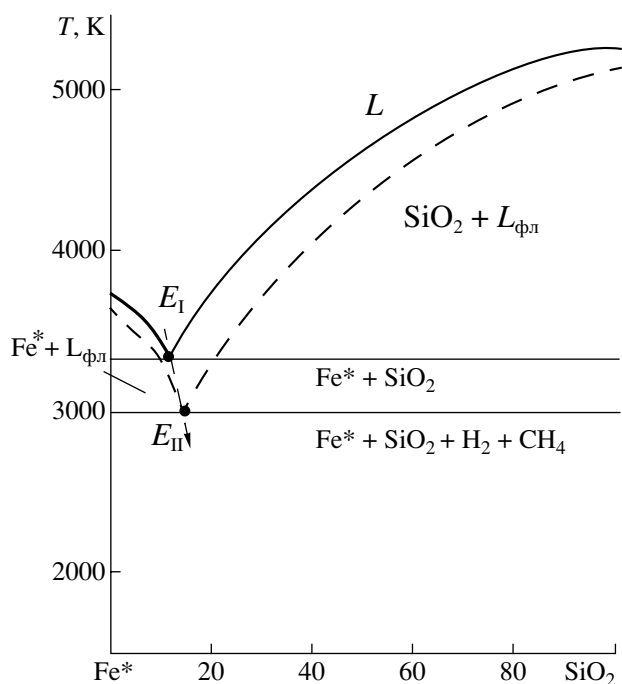


Рис. 1. Кривые зависимости температуры плавления от состава для Fe–SiO₂: в сухой системе на основе [7, 8, 13] и при наличии примеси CH₄ и H₂ (намечена штриховой линией).

расплав обогащен SiO₂, насыщен флюидом и обеднен Ca*SiO₃. В предыдущей работе [4] мы принимали во внимание только возможные соотношения железистых фаз и не учитывали вероятный состав мантии, поэтому не могли оценить состав образующегося расплава.

Что касается состава флюидной фазы, то в реакциях (б) и (в) учтена метановая фаза CH₄, исходя из состава газовой-жидких включений в алмазах [10] и других минералах мантии, карбонатизации кимберлитов, ассоциации их и других мантийных магм с карбонатами [11] и наличия модификации твердого углерода во внешнем ядре, предполагаемого на основе физических экспериментов [12]. CO в реакциях (б) и (в) по мере подъема плюма будет превращаться по реакции Будуара $2\text{CO} = \text{C} + \text{CO}_2$, поэтому количество CO₂ в верхних оболочках будет в 2 раза меньше, чем исходное количество CO. Мы можем отдать предпочтение реакции (б), учитывая состав флюидной фазы в алмазах [10] и соотношение $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \approx 0.7$ в верхних оболочках Земли с учетом водных минералов и карбонатов. Однако реальное соотношение H₂O и CO₂ в истории Земли, вероятно, менялось в связи с диссипацией водорода в космос, растворением воды в астеносферных расплавах и слое С верхней мантии [2].

На ранних стадиях развития Земли могли обладать H₂ (в ядре) и H₂O (в верхних оболочках),

т.е. реакция (а). Метан расходовался на образование модификации твердого углерода во внутреннем ядре. В дальнейшем реакция (а) смещалась через (в) в сторону реакции (б), поскольку алмаз стал растворяться при взаимодействии с конвектирующим внешним ядром, образуя избыточный CH₄, тогда как концентрация H₂ во внешнем ядре могла поддерживаться на постоянном уровне или снижаться.

Из фаз, участвующих в реакциях (а)–(в), известна температура плавления стишовита на границе ядро–мантия, приблизительно равная 5200 К и температура плавления железа (с примесью Ni, Mn и Cr), составляющая около 3700 К [7, 13]. Эвтектика E_I (Fe + SiO₂) была оценена нами ранее около 12% SiO₂ [4]. На основании этих данных построена верхняя кривая на рис. 1. Наличие в эвтектике растворенных CH₄ и H₂ (эвтектика E_{II}) снижает ее температуру еще на 250–300 К, сдвигая ее состав в сторону ~15% SiO₂ (нижняя кривая на рис. 1), хотя возможен и обратный эффект, это зависит от состава флюида и его относительной растворимости в расплавах Fe и SiO₂. При таких соотношениях мы можем оценить влияние примеси (SiO₂ + флюид) на температуру плавления Fe, поделив разность температуры $\Delta T = T_{\text{Fe}} - T_{\text{EII}} = 600$ К на концентрацию примеси (SiO₂ + флюид), равную $c_1 = 15\%$. Тогда получаем значение коэффициента $k_1 = \Delta T/c_1 = 40$ К на 1% примеси.

Определить снижение температуры эвтектики E_{III} (магнезиовюстит+стишовит+перовскит) довольно трудно. Поскольку эта эвтектика, как следует из реакций (а)–(в), обогащена SiO₂ и флюидом, то в первом приближении можно оценить это снижение той же величиной, что и для эвтектики E_{II}, но с большим разбросом, например $k_{\text{II}} = 40 \pm 20$ К/%. С допустимым приближением мы можем также считать, что главным компонентом, определяющим величину k_{II} , является H₂O в расплаве, сильнее всего влияющая на температуру плавления силикатно-окисных расплавов, т.е. значения концентрации c_1 и c_2 , приводимые ниже и составляющие 1–5%, можно рассматривать как концентрацию H₂O в расплаве плюмового канала.

Как следует из экспериментов, диаметр канала плюма мало меняется в процессе подъема и соизмерим с диаметром кровли и подошвы плюма, т.е. диаметром d_s источника тепла и химической добавки концентрацией c_1 , понижающей температуру плавления массива [2, 3]. Подвод тепла осуществляется на нижней границе (подошве плюма), представляющей с достаточным приближением горизонтальную поверхность, температура которой T_1 больше температуры расплава (эвтектики E_{III}): $T_1 > T_{\text{EIII}}$. У кровли плюма происходит плавление твердого массива со скоростью u_0 . Кровлю также можно

рассматривать как горизонтальную поверхность, к которой через расплав подводятся тепло и химическая добавка концентрацией c_2 , понижающая температуру плавления массива.

Для условий нижней мантии при числе Прандтля $Pr = \nu/a \gg 1$ определяющим критерием для свободно-конвективного движения является только число Рэлея $Ra = \beta g \Delta T l^3 / a \nu$, где ν – кинематическая вязкость, a – температуропроводность, β – коэффициент теплового расширения, g – ускорение силы тяжести, ΔT – разность температуры подошвы и кровли плюма, l – линейный размер (например, высота плюма L или диаметр источника d_s). В этом случае закон теплообмена для $Ra > 10^5$ имеет вид [2, 3]

$$Nu = ql/\lambda \Delta T = 0.18 Ra^{1/3}, \quad (1)$$

где Nu – число Нуссельта (безразмерный коэффициент теплообмена), q – удельный тепловой поток, λ – коэффициент теплопроводности.

Когда влияние массообмена на гидродинамику и теплообмен при свободной конвекции несущественно, интенсивность массообмена определяется свободной конвекцией в плюме. Наблюдается аналогия между теплообменом и массообменом при свободной конвекции, и критериальное уравнение (закон массообмена) для $Ra > 10^5$ имеет вид, подтверждаемый экспериментами [14],

$$Nu_c = m_s l / \rho_0 D \Delta c = 0.18 (Ra \cdot Le)^{1/3}, \quad (2)$$

где Nu_c – безразмерный коэффициент массообмена, m_s – удельный массовый поток химической добавки от подошвы плюма, Δc – разность концентраций добавки на подошве и кровле, ρ_0 – плотность добавки, в качестве коэффициента диффузии добавки в расплаве D принимается наибольшее значение для многокомпонентной смеси – коэффициент диффузии H_2O , $Le = a/D$ – число Льюиса.

Вблизи вертикальной границы раздела расплав–массив (боковой стенки плюмового канала) есть пограничный слой, возникающий вследствие охлаждения расплава в канале (отвода тепла в массив). Течение в пограничном слое нисходящее. Вблизи подошвы с температурой T_1 (источника тепла и химической добавки диаметром d_s) существует крупномасштабное течение: нисходящее у боковой поверхности цилиндрического плюмового канала, восходящее у вертикальной оси канала и горизонтальный поток вдоль нагреваемой поверхности. Вблизи подошвы также формируется пограничный слой с валиковыми течениями, оси которых направлены вдоль крупномасштабного горизонтального потока, от боковой границы к центру канала. Температура нисходящего крупномасштабного потока вдоль боковой поверхности плюмового канала равна температуре плавления $T_{пк}$, создающейся при наличии в канале химической

добавки. Однако вне пограничного слоя вблизи подошвы средняя температура \bar{T} выше, чем $T_{пк}$, и перепад температуры в пограничном слое вблизи подошвы в первом приближении равен $\Delta T_s = (T_1 - T_{пк})/2$. С использованием соотношения (1) находим удельный тепловой поток q_s от источника на подошве плюма для числа Рэлея $Ra = \beta g \Delta T_s d_s^3 / a \nu > 10^5$:

$$q_s = 0.18 \lambda \Delta T_s^{4/3} (\beta g / a \nu)^{1/3}. \quad (3)$$

Аналогично, из соотношения (2) получаем удельный массовый поток m_s химической добавки от подошвы плюма:

$$m_s = 0.18 \rho_0 \Delta c_s D^{2/3} (\beta g \Delta T_s / \nu)^{1/3}. \quad (4)$$

Разность концентраций Δc_s задается таким же образом, как и перепад температуры ΔT_s в пограничном слое: $\Delta c_s = (c_1 - c_2)/2$, где c_1 – концентрация химической добавки на подошве плюма (в случае границы ядро–мантия – концентрация добавки, поступающей из ядра), c_2 – концентрация добавки на границе раздела расплав–твердый массив (на границе плюма).

Если поток тепла и химической добавки от стенок плюмового канала много меньше потоков от подошвы и к кровле плюма и диаметры подошвы и кровли примерно равны, то получаются следующие уравнения:

$$\Delta T_s = \Delta T_r \quad \text{и} \quad \Delta c_s = \Delta c_r, \quad (5)$$

где $\Delta T_r = T_r - T_{пк}$ (T_r – температура расплава вблизи кровли плюма), $\Delta c_r = c_r - c_2$ (c_r – концентрация добавки в расплаве у кровли).

Скорость подъема термохимического плюма, полученная при анализе теплообмена и вытекающая из уравнений (1) и (3), должна быть равна скорости подъема, найденной при анализе массообмена и вытекающей из (2) и (4). В этом случае

$$\Delta c_r / \Delta c_0 = Le^{2/3} \Delta T_r / (B/C + \Delta T_0), \quad (6)$$

где $\Delta c_0 = c_2 - c_0$, c_0 – концентрация добавки в окружающем массиве, $\Delta T_0 = T_{пк} - T_0$, T_0 – средняя температура массива, B – теплота плавления пород вблизи кровли, C – их теплоемкость.

Зависимость температуры плавления от концентрации химической добавки на границе плюма можно представить в линейном приближении:

$$T_{пк} = T_{пк} - k c_2, \quad (7)$$

где $T_{пк}$ – температура плавления “сухого” массива (без химической добавки).

Разность температуры плавления “сухого” массива и средней температуры массива T_0 берется как $T_{пк} - T_0 = 420^\circ\text{C}$, разность температуры $T_{пк}$ и температуры подошвы T_1 : $T_{пк} - T_1 = 20^\circ\text{C}$. До-

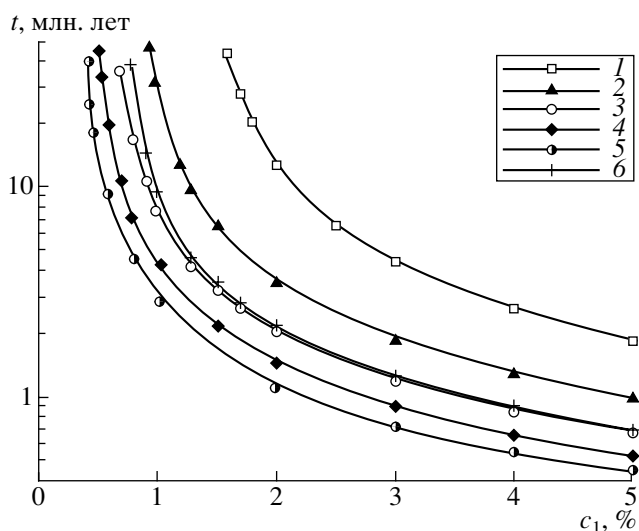


Рис. 2. Время подъема термохимического плюма от границы ядро–мантия в зависимости от концентрации химической добавки на подошве для различных k ($^{\circ}\text{C}/\%$). 1–5 – при $d_s = 100$ км; 1 – 15, 2 – 25, 3 – 35, 4 – 45, 5 – 55; 6 – при $d_s = 30$ км: 35.

бавка на подошве подводится локально, и ее концентрация в окружающем твердом массиве $c_0 = 0$. Кроме того, в расчетах принимаются следующие значения параметров: $a = 10^{-6}$ м²/с, $Le = a/D = 100$, $d_s = 30$ и 100 км, кинематическая вязкость расплава в канале плюма $\nu = 1$ м²/с, теплопроводность расплава $\lambda = 5$ Вт/м $\cdot^{\circ}\text{C}$, $\beta = 3 \cdot 10^{-5}$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$, $B = 210$ кДж/кг, $C = 1.2$ кДж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$.

В результате решения системы уравнений (5)–(7) без учета тепло- и массообмена от боковой границы плюмового канала найдена разность температуры подошвы и температуры плавления при наличии химической добавки $T_1 - T_{\text{пл}}$. Эта разность может составлять от 13 до 44 $^{\circ}\text{C}$ и, соответственно, перепад температуры вблизи подошвы плюма $\Delta T_s = (T_1 - T_{\text{пл}})/2 = 6.5\text{--}22^{\circ}\text{C}$ для концентрации химической добавки (в первом приближении – H₂O) на подошве $c_1 = 2\text{--}4\%$ и коэффициента $k = 25\text{--}45^{\circ}\text{C}/\%$. Концентрация добавки в расплаве вблизи кровли плюма $c_r = (0.68\text{--}0.85)c_1$ для указанных значений k и c_1 . Концентрация добавки на границе расплав–твердый массив $c_2 = (0.32\text{--}0.66)c_1$ для $k = 25\text{--}55^{\circ}\text{C}/\%$ и $c_1 = 2\text{--}4\%$. Наибольший интерес представляют время подъема и минимальный диаметр термохимического плюма, рассчитанные уже с учетом тепло- и массообмена от боковой поверхности плюма, поднимающегося от границы ядро–мантия на предельную высоту $L = 2.9 \cdot 10^6$ м. Именно эти параметры можно сопоставить с геологическими и геофизическими данными.

Результаты расчета времени подъема плюма t приведены на рис. 2 для различных c_1 и $k = 35 \pm \pm 20^{\circ}\text{C}/\%$, взятых в соответствии с пояснением в тексте к рис. 1. Важным доводом в пользу образования плюмов на границе ядро–мантия является корреляция интенсивности мантийно–плюмового магматизма и числа магнитных инверсий, связанных, вероятно, с процессами во внешнем ядре [2, 15]. Время выхода одного плюма на поверхность может быть меньше 5 млн. лет и, возможно, сопоставимо со средним периодом инверсии, равным 0.5–1 млн. лет. Как видно из рис. 2, время подъема от 1 до 5 млн. лет может быть достигнуто для всех k , но для $c_1 > 1\%$. Время менее 1 млн. лет достигается только при высоких $k \geq 35^{\circ}\text{C}/\%$ и концентрации добавки $c_1 = 3\text{--}5\%$.

Минимальный диаметр плюма $d_{\text{мин}}$ может составлять 6–12 км для $k = 25\text{--}45^{\circ}\text{C}/\%$ и $c_1 = 2\text{--}3\%$. Эти значения близки к амплитуде рельефа границы ядро–мантия порядка 10–20 км [2, 4]. Диаметр источника попадает в интервал от 10 до 20 км, когда концентрация добавки c_1 лежит в промежутке от 0.7 до 2.5% для $k = 25\text{--}45^{\circ}\text{C}/\%$.

Итак, в результате проведенного анализа оценены физико-химические условия формирования термохимических плюмов на границе ядро–мантия и рассчитаны их основные физико-химические параметры. Оценочные значения этих параметров соответствуют имеющимся на сегодня данным, что указывает на реальность существования термохимических плюмов, играющих основную роль в тектонике горячих полей.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия отечественной науке (грант по программе “Молодые кандидаты и доктора наук РАН. Выдающиеся ученые РАН” на 2003 г.), Сибирского отделения РАН (молодежный проект по наукам о Земле), Президиума РАН (интеграционный проект 6.5.3 с Президиумом РАН), РФФИ (грант 02–05–64627) и Министерства науки РФ (Государственный контракт от 1 февраля 2002 г. № 43.043.1.1.1601 по теме: “Компьютерные модели процессов, протекающих в недрах Земли”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зоненишайн Л.П., Кузьмин М.И. // Геология и геофизика. 1993. Т. 34. № 4. С. 3–13.
2. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “ГЕО”, 2001. 408 с.
3. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Гладков И.Н. // Геология и геофизика. 1993. Т. 34. № 12. С. 5–21.
4. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г. // ДАН. 2000. Т. 373. № 1. С. 84–86.
5. Tackley P.J. Role of the Superplumes in the Earth System from Central Core to Surface Including Evolution of life. Abstr. Tokyo, 2002. P. 398–402.

6. Пуцаровский Д.Ю. // УФН. 2002. Т. 172. № 4. С. 480–485.
7. Луо Ш.-Н., Мосенфелдер Дж. Л., Асимов П.Д., Аренс Т.Дж. // УФН. 2002. Т. 172. № 4. С. 475–480.
8. Luo S.-N., Cağın T., Strachan A. et al. // Earth and Planet. Sci. Lett. 2002. V. 202. P. 147–157.
9. Allegre C.J., Poirier J.-P., Humler E., Hoffmann A.W. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1995. V. 134. P. 515–526.
10. Зубков В.С. // Геохимия. 2001. № 2. С. 131–145.
11. Доусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983. 300 с.
12. Титов В.М., Караханов С.М., Бордзиловский С.А. и др. В сб.: Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях. Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. С. 79–81.
13. Boehler R. // Nature. 1993. V. 363. P. 534–536.
14. Кувишинов Г.Г. // ПМТФ. 1983. № 4. С. 50–54.
15. Larson R.L., Olson P. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1991. V. 107. P. 437–447.